

Ballistisen tuulen virheellisyydestä.

Kirjoittanut Yleisesikuntaeverstiluutnantti L. Kaje.

I. Yleistä.

Voimme täydellä syyllä olla ylpeitä tykistöemme tulen tarkkuudesta, mutta kuitenkin tämä tarkkuus on sangen suhteellinen käsite. Pelkästään hajontailmiöstä johtuu, että esim. jokin yksinäinen puu saattaa olla ampumakentällä vakinaisena maalina jopa vuosikymmeniä, säilyen siitä huolimatta ulkonäöltään kutakuinkin muuttumattomana. Edelleen ei huolellisinkaan valmistelu pysty takaamaan, että iskemäkeskipiste on maalissa, mikäli maali-alue on suhteellisen pieni. Tykistötulen tarkkuudella on siis tietyt rajansa, joita emme ilman muuta pysty ylittämään. Ja meidän on pakko myöntää, että nämä rajat ovat toistaiseksi siksi epäedulliset, että joudumme taistelukentällä usein tilanteeseen, jolloin tulen epätarkkuudesta on aivan ilmeistä haittaa.

Voidaanko tarkkuutta sitten parantaa? Ainakin siihen on pyrittävä. Mutta ennen kuin mitään asiaa voidaan määrätietoisesti viedä eteenpäin, on yksityiskohtaisesti tunnettava kaikki mahdollisesti vaikuttavat tekijät. Mitä nimenomaan ammuntaan tulee, sen tarkkuuteen vaikuttavien tekijöiden lukumäärä on odottamattoman suuri. Säätekijät muodostavat niiden joukossa oman ryhmänsä, mikä sekin on liian suuri yhden kirjoituksen puitteissa tyhjentävästi käsiteltäväksi. Kirjoituksen tarkoituksena on valottaa kysymystä hyvin suppealta alalta tarkastelemalla tuulisuhteitten merkitystä tykistöllisenä tekijänä.

Alempana esitetyt tulokset perustuvat suhteellisen runsaaseen pilot-havaintomateriaaliin toukokuulta 1947. Havainnot tehtiin

Niinisalossa 18 päivänä, enintään 13 havaintoa päivässä, klo 7,30—19,00 välisenä aikana. Yöhavaintojen tekeminen olisi ollut suotavaa, mutta ne olisivat liiaksi rasittaneet vähälukuista miehistöä. Jo päivähavaintojenkin suorittaminen näin tiheästi tuottaa vaikeuksia. Pisimmät havainnot voivat valmisteluineen viedä aikaa lähes tunnin, ja lisäksi ruokailuajat katkaisevat havaintotoiminnan. Tuloksia esittävien käyrien säännöllisyys (pyöristelyjä ei ole suoritettu) osoittaa, että havaintojen lukumäärä on yleensä ollut riittävä.

Pilot-pallojen nousua seurattiin kolmella teodoliitilla, vaikkakin kahden käyttöä yleisesti pidetään riittävänä. Kolmen teodoliitin avulla tarkkuus kuitenkin tuntuvasti paranee, ja varusmiehiä käytettäessä on kokemus osoittanut menettelyn ennen kaikkea varmistuskeinona tarpeelliseksi. Tuulen epävakaisuudesta aiheutuviin epätarkkuuksiin verrattuina ovat havaintovirheet niin pieniä, että saatuja tuuliarvoja voidaan pitää absoluuttisesti oikeina arvoina.

On erikoisesti merkille pantavaa, että tulokset koskevat vain toukokuun olosuhteita. Aineistoa on tosin kertynyt useamman vuoden ajalta ympäri vuoden, mutta laskelmia ei ole suoritettu loppuun. Kun otamme huomioon, että yhtä kuukautta koskevan materiaalin käsittelyssä on suoritettava jopa kymmeniä tuhansia erilaisia laskutoimituksia, käsitämme, ettei tuloksia voi saada irti käden käänteessä.

Esitettävien seikkojen ymmärtäminen tuottanee vaikeuksia, elleimme ensin alustavasti käsittele eräitä tuulen yleistä luonnetta kuvaavia ominaisuuksia.

II. Tuulen luonteesta.

Liiikkeessä olevaa ilmaa nimitämme yleisesti tuuleksi. Sillä on, paitsi horisontaalista komponenttia (ammattikielellä advektio), myös vertikaalikomponentti, jota tosin emme sen pienuuden takia yleensä huomaa. Ilmakehän yleinen sirkulaatio ilmenee laajoja alueita käsittävinä ilmavirtauksina, tuulina, joiden mukana erilaisia ominaisuuksia omaavat ilmamassat siirtyvät maapallon eri vyöhykkeiltä toisille.

Liikkeessä olevat ilmamassat ovat ominaisuuksistaan riippuen eri määrässä alttiita eräille häiriötekijöille, joiden vaikutus ilmenee siinä, että tasainen, laminaarinen ilmavirta muuttuu pyörteiseksi, turbulენტtiseksi. Tavallisesti erotetaan kaksi eri turbulenssi-muotoa: dynaaminen turbulenssi ja terminen turbulenssi eli konvektio. Ilmavirran liikkeessä epätasaisella maanpinnalla aiheuttavat siinä olevat esteet muutoksia ilman liiketilaan sekä horisontaali- että vertikaalisuunnassa. Sama vaikutus on eri nopeuksilla liikkuvien ilmavirtausten rajapinnoilla. Näin syntyvää turbulენტtisuusmuotoa nimitämme dynaamiseksi turbulenssiksi. Häiriöitten luonne on lähinnä kuvattavissa pyörteisyydeksi. Ilma-kerroksen epätasainen lämpeneminen lähellä maanpintaa ja lämpenemisestä johtuva nopea lämpötilan lasku ylöspäin antavat aiheen kesäpäivinä tyypillisille vertikaalisille ilmavirroille. Tällöin on kysymyksessä terminen turbulenssi. Ilman liiketila muuttuu siis turbulenssin vaikutuksesta tietyssä mielessä sekasortoiseksi, mutta aivan säännötön ei tällainenkaan liiketila havaintojeni mukaan ole. Pyörremuodostumien ulottuvuudet voivat vaihdella laajassa asteikossa, millimetreistä aina kilometreihin saakka.

Ilman turbulენტtisen tilan havaitsemme jokapäiväisessä elämässä tuulen puuskaisuutena, joka vaihtelee riippuen säätilasta ja siis mm. ilmamassojen ominaisuuksista. Pohjoisesta virtaava ilma on yleensä kylmää ja lämpimää alaosiltaan etelään päin siirtyessään. Lämpötilan aleneminen ylöspäin (vertikaalinen lämpötilagradientti) muodostuu siinä siis suureksi, josta on seurauksena taipumus termiseen turbulენტtisuuteen (labiili ilmamassa). Tämä taas aiheuttaa myös dynaamisen turbulenssin kasvun. Etelästä tuleva lämmin ilmamassa kylmenee alaosiltaan, joten vertikaalinen lämpötilagradientti pienenee. Nousevia ilmavirtoja ei synny, ja turbulenssia kehittyy vain dynaamisista syistä (stabiili ilmamassa). Turbulenssi, nimenomaan dynaaminen, pienenee ylöspäin noustaessa nopeasti. Dynaaminen turbulenssi on riippuvainen tuulen nopeudesta. Alle 4 m/sek. tuulilla se on Chromowin mukaan mitättömän pieni, mutta kasvaa nopeasti tuulen nopeuden ylittäessä tämän rajan. (Chromow: Einführung in die synoptische Wetteranalyse, 1942, sivu 62.)

Edellä esitetty ylimalkainen kuvaus kaipaa vielä huomattavia täydennyksiä. Mitä dynaamiseen turbulenssiin tulee, tyydymme

toteamaan, että sen vaikutus ainakin pääasiassa rajoittuu lähellä maanpintaa oleviin ilmakerroksiin. Kun on kysymys termisestä turbulenssista, on tilanne monimutkaisempi.

Jos ilmassa on labiili hyvin korkealle, on nousevassa liikkeessä olevilla ilmapyörteillä aikaa yhtyä suuremmiksi pyörteiksi, ja vertikaalinen nopeus ehtii kiihtyä useampaan metriin sekunnissa. (Kuiva ilmassa on labiili, kun pystysuora lämpötilagradientti on suurempi kuin $1^{\circ}/100$ m.) On odotettavissa, että puuskaisuus tällaisissa tilanteissa kasvaa. Kokemus osoittaa, että näin onkin asianlaita. Havaintojeni mukaan puuskaisuus (kesällä) vasta silloin saavuttaa poikkeuksellisen suuria arvoja, kun labiilin kerroksen paksuus lähentelee kahta kilometriä. Merkille pantavaa on, että horisontaalinen puuskaisuus on tässäkin tapauksessa yleensä suurin. Noin kilometrin korkeuteen ulottuvaa labiiliisuutta voimme kesällä iltpäivisin pitää sääntönä.

Nousevien ilmavirtojen mukana siirtyy ylempiin ilmakerroksiin myös kosteutta. Lämpötilan laskiessa tapahtuu määräkorkeudella tiivistyminen ja pilvien muodostus. Kajoamatta tarkemmin teoriaan toteamme, että pilvipeite voi muodostua yhtenäiseksi tai osittaiseksi. Kysymys ei ole ns. säärintamiin liittyvistä tapauksista. (Teoriasta kiinnostunut voi tutustua asiaan esim. kirjasta Petterssen: *Weather analysis and forecasting*, 1940, erikoisesti sivu 71.) Tietyissä olosuhteissa vain osa alhaaltatulevista impulseista säilyttää energiapitoisuutensa jotakin määräkorkeutta ylemmänä. Pilvet muodostuvat erillisiksi, ja nousevat ilmavirrat keskittyvät suhteellisen harvoihin paikkoihin. Olosuhteista riippuen pilvikumpareet voivat kehittyä hyvin korkeiksi ja myös horisontaaliset ulottuvuudet kasvavat. Nousevien ilmavirtojen keskittyminen on ilmeisesti omiaan lisäämään yleistä puuskaisuutta, joka siis on suuri silloin, kun taivaalla on korkealle kehittyneitä kumpupilviä tai ukkospilviä.

Huomaamme siis, että puuskaisuus on läheisessä yhteydessä erikoisesti konvektiovirtauksiin liittyviin tekijöihin. Kesällä on labiilisuudella ja vastaavasti konvektioilla sekä puuskaisuudella havaittavissa selvä vuorokautinen vaihtelu. Puuskaisuus on suurin iltpäivisin, mikä johtuu pohjimmiltaan auringon säteilyvaikutuksista. Päivällä yleensäkin ovat termiset turbulentsuustekijät puuskaisuuden synnyttäjinä määrääviä. Kuitenkin dynaa-

miset vaikutukset samalla vahvistuvat. Yöllä voimme pitää puhtaasti dynaamisia tekijöitä määräävinä, mikäli on kysymyksessä puuskaisuuden vuorokautinen vaihtelu. Uuden ilmamassan tunkeutuminen paikkakunnalle voi muuttaa puuskaisuuden täydellisesti riippumatta vuorokauden ajasta.

Edellä oleva koskee lähinnä olosuhteita mantereella. Maanpinnan muoto ja laatu ovat merkittäviä tekijöitä turbulentsisuuden suhteen yleensäkin. Kohoamat ja esteet lisäävät ennen kaikkea dynaamista turbulenssia, mutta voivat myös olla »irroittavia» tekijöitä konvektioitten alkuunpanemisessa. Hiekkakankaat ja mäenrinteet lämpenevät tavallisesti voimakkaammin kuin ympäristö, ja nousevat virrat keskittyvät helposti tällaisiin paikkoihin. Merellä lämpötilasuhteet ovat tasaisia. Siellä konvektioita muodostuu paremminkin yöllä kuin päivällä.

On tuskin luultavaa, että konvektiovirtaukset tapahtuvat tasaisesti jatkuvina sellaiseltakaan paikalta, mikä on niiden syntymiselle erityisen suotuisa. On esitetty ajatus, että auringon (maanpinnan välityksellä) lämmittämä ilma muodostaisi maanpinnalla eräänlaisen »ilmakuplan», joka tiettyyn kokoon kasvettuaan kuroutuisi irti nousten ylöspäin. Seurauksena olisi »pulseittain» tapahtuvia pystyvirtauksia, jollaisista todella tapaamme selviä merkkejä ilmakehässä. Niinä voimme usein todeta, että erilliset kumpupilvet kulkevat taivaalla säännöllisissä jonoissa. Pilvet ovat muodostuneet perättäisin väliajoin samassa paikassa. Erään tällaisen kumpupilvijonon syntymistä seurattessani havaitsin »pulseerauksen» tapahtuvan suunnilleen minuutin väliajoin. Joka tapauksessa on todettavissa, että voimakkaan puuskaisuuden vallitessa havaintopaikan ilmamassassa tapahtuu rytmillisiä muutoksia, jotka ilmenevät esim. lämpötilan ja kosteuden vaihteluina, kuten piirtävien mittarien käyristä näemme. Minuutin kestäviä jaksoja emme tällä keinoin kuitenkaan pysty toteamaan. Ilmiön selittämiseksi ei em. teoria sellaisenaan ole välttämätön.

Puuskien rakenteen ja ulottuvuuksien tunteminen on tykistöolisestikin tärkeitä. Omakohtaiset tutkimukset ovat tältä osalta alkuasteellaan. Mitä puuskien kestoaikaan tulee, ovat prof. V. Väisälän mukaan noin 10 minuuttia kestävät jaksot hyvin tavallisia. (Vilho Väisälä: Über die Wirkung der Windschwankungen auf die Pilotbeobachtungen, 1925, 1932.) Mikäli siis tahdomme

pilot-havaintojen avulla tutkia asiaa, on havaintoja suoritettava hyvin tiheästi perättäin, jos havainnot tehdään samalta paikalta. Edullisinta olisi suorittaa havaintoja siten, että palloja laskettaisiin irti useammalta paikalta yhtäaikaan, mutta tällöin tarvittaisiin hyvin runsaasti koulutettua henkilökuntaa. Käytettävissäni on yksi ainoa Niinisalossa tehty havaintosarja, jossa pallot laskettiin ylös viiden minuutin väliajoin. Havainnot suoritettiin kolmea teodoliittia käyttäen 25. 9. 48 tunnin kuluessa klo 14,05—15,05. Vaikka tämän kirjoituksen tarkoituksena on käsitellä olosuhteita toukokuussa, lienee kiintoisaa lyhyesti tarkastella havaintosarjasta saatuja tuloksia.

Havainnot ulottuivat lähes 800 m:n korkeuteen. Koko kerroksessa puhalsi luoteistuuli keskimäärin hiukan alle 3,5 m/sek. nopeudella. Puuskaisuuden, mikäli syyt ovat dynaamisia, pitäisi näissä olosuhteissa olla pieni. Niin ei kuitenkaan ollut asianlaita. Ilmeisesti siis termisillä tekijöillä oli huomattava vaikutus. Ensimmäisessä 200 m:n kerroksessa tuuli puuskaili pääasiassa keskituulen suunnassa: pienin nopeus oli 1 m/sek. ja suurin 5 m/sek., joten koko vaihtelu oli 4 m/sek. Keskituulta vastaan kohtisuoraan sivulle päin vaihteli tuulivektori noin 1 m/sek. sekä oikealle että vasemmalle. Kerroksessa 200—400 m ensinmainittu vaihtelu oli pienentynyt määrään 3 m/sek., heikoimman tuulen ollessa 2 m/sek. Jälkimmäinen vaihtelu oli yhtä suuri kuin aikaisemminkin, mutta tuulen sivulle kääntymistä tapahtui useammin. Kerroksissa 400—600 m ja 600—800 m tuulen puuskailu tapahtui pääasiassa keskituulta vastaan kohtisuoraan, ilmeten siis tuulen suunnan muutoksina nopeuden pysyessä likimain samana. Tämän puuskaisuusvaihtelun määrä (vektorinmuutoksena) oli noin 3,5 m/sek., vastaten 1 000 piirun (60°) suuntaeroa ääriasentojen välillä. Vertikaaliset nopeudet vaihtelivat kaikissa kerroksissa suunnilleen samoissa rajoissa: suurimmat nousuvirtaukset noin 2 m/sek. tai ylikin ja suurimmat laskevat virtaukset lähes 1 m/sek. Puuskien kesto-aika oli keskimäärin 15 minuuttia. Voimakkaita puuskia oli kuitenkin vain kaksi. Toiseen liittyivät voimakkaat horisontaalivirtaukset, toiseen lisäksi myös voimakkaat vertikaalivirtaukset. Viimeksi mainitussa tapauksessa ulottuivat suhteellisen vahvat nousevat virrat läpi koko 800 m paksun kerroksen. Muissa tapauksissa näytti vertikaalitasossa muodostuvan matalampia sirkulaatio-

piirejä. Mikäli puuska-alueet kulkevat likimäärin keskituulen nopeudella, tulee em. voimakkaaseen vertikaalipuuskaan liittyvän nousualueen pituudeksi alhaalla noin 1,5 km, alueen kavetessa ylöspäin virtausten kääntymisen takia osaksi sivulle. Näyttää siltä, että takaapäin tuleva (kylmä) laskeutuva virta tunkeutuu alhaalla nopeammin eteenpäin heittäen edessä olevan (lämpimämmän) ilman ylös. Yksityiskohtaisempi analysointi edellyttäisi vieläkin tiheämpää havaintojen suorittamista. Mainittakoon vielä, että puuskaisuuden horisontaali- ja vertikaalikomponenteilla on usein taipumusta saavuttaa ääriarvonsa samanaikaisesti. (Kun tuuli on kääntynyt eniten oikealle, saattaa nouseva virtaus olla voimakkain. Tuulen ollessa eniten vasemmalle on laskeva virta vahvin jne.)

Tuulipiirroksia tarkastelemalla havaitsemme myös pitempiä, jopa tuntikausia kestäviä tuulen muutosten jaksoja. Toiselta puolen tunnemme jokainen lyhyet, vain muutaman sekunnin kestävät jaksot. Ainakin tykistöllisessä mielessä on em. 10 tai 15 minuuttia kestävät jaksot luettava tyyppillisiksi puuskiksi. Edellä on näin tehtykin. Kun on kysymys tuulen vaihteluista, jotka liittyvät sääkartoissa erotettaviin ilmanpainesysteemeihin, käsittävät niiden jaksot jo suuren osan vuorokaudesta tai päiväkausiakin. Tuulipiirroksissa on puuskaisuusvaihtelu näistä pitkäjaksoisista vaihteluista (harvoja poikkeuksia lukuunottamatta) suhteellisen helposti erotettavissa ja siis myös eliminoitavissa. Jäljelle jäänyt keskimääräisen tuulen pitkäjaksoinen vaihtelu määrittää kussakin tapauksessa, kuinka nopeasti esim. ballistinen tuuli vanhenee, siis muuttuu virheelliseksi.

Ballistisen tuulen vanhenemisen ohella aiheutuu sääsanomaan virhettä myös tuulen puuskaisuuden takia. Puuskaisuudella on myös jossakin määrin vaikutusta ammuksen lentorataan. Seuraavassa käsittelemme näitä seikkoja tarkemmin.

III. Tuulesta johtuvat virheet ammunnoissa.

a) Tykistön sääsanoman virheellisyys.

Tykistö (vastaavasti krh:t) saa tarvitsemansa tiedot tuulisuh-teista sääsanomaan liittyvänä ns. ballistisena tuulena. Sääsano-mien väliaika on tavallisesti 4 tuntia. Ballistinen tuuli merkitsee karkeasti määriteltynä suunnilleen samaa kuin lakikorkeutta vas-taavan kerroksen keskituuli, kuitenkin tietyllä tavalla korjattuna ns. kerrospainoja käyttämällä. Kenttäoloissa tuuli lasketaan pilot-havainnosta, jossa palloa käytännöllisistä syistä seurataan vain yhdellä teodoliitilla. Tulevaisuudessa osa teodoliiteista epäi-lemättä korvataan tutkalaitteilla, jolloin havainnonteko tulee riippumattomaksi pilvipeitteestä. Mainittakoon, että tutkahavain-non tarkkuus ei nykyisin ylitä hyvällä säällä tehdyn »yhden teodoliitin havainnon» tarkkuutta.

Koska pilot-havainnoissa kenttäoloissa käytetään vain yhtä teodoliittia, emme voi millään tavalla tarkistaa pallon nousu-nopeutta. Teoreettisesti nousunopeus on miltei vakio. (Teoriasta esim. erikoisjulkaisussa Vilho Väisälä und Niilo Kallio: Steig-geschwindigkeiten von Pilotballonen, 1937.) Nousunopeuteen aiheut-tavat virhettä pääasiassa seuraavat tekijät:

- 1) mikroturbulenssi,
- 2) varsinainen vertikaalipuuskaisuus ja
- 3) maastolliset tekijät.

Joukko muitakin tekijöitä on, esim. pallon täyttövirheet, pal-lon lämpeneminen auringossa, pallon muodon vaihtelut, kumi-aineen laatuerot ym. Yllä luetellut ovat kuitenkin määrääviä ja muiden tekijöiden käsittely veisi liiaksi tilaa.

Maastolliset tekijät liittyvät läheisesti vertikaalipuuskaisuuteen. Niitä on kuitenkin syytä erikoisesti korostaa, koska maaston hai-tallisia vaikutuksia voidaan vähentää sääaseman paikan sopivan valinnan kautta. Kukkulan rinteet ja vesistöjen rannat suosivat vertikaaliliikkeitä, joten tällaisia paikkoja on vältettävä.

Ulottuvuuksiltaan kaikkein pienintä turbulenssin muotoa nimi-tetään mikroturbulenssiksi. Mikroturbulenssi on voimakkein lähellä maanpintaa ja sillä on huomattava vaikutus pallon nousu-nopeuteen. Sen voimakkuus kasvaa yleisen turbulentsisuuden

kasvaessa: mitä suurempi vertikaalinen lämpötilagradientti ja kovempi tuuli, sitä voimakkaampi turbulenssi. Turbulenttisessa ilmassa pallo nousee normaalia nopeammin, vaikka varsinaisia vertikaalisia ilmavirtoja ei olisikaan. Viimeksi mainittujen merkitys on ilman muuta selvä. Mikroturbulenssin vaikutusta on käytännössä vaikea erottaa suoranaisten vertikaalisten ilmavirtojen vaikutuksesta.

Nousunopeusvirhe aiheuttaa vuorostaan virheen ballistiseen tuuleen: liian pieni nousunopeus antaa liian kovan tuulen ja päinvastoin. Laskelmiin käytetty materiaali on toistaiseksi ollut suhteellisen pieni. Ammuntaan vaikuttava virhe 30 sek. lentoajalla on keskimäärin ollut alle 1 m/sek. (Matkavirheen aiheuttaa vain ampumasuuntaan lankeava komponentti, sivuvirhe taas on käytännössä merkityksetön.) Laskevien ilmavirtojen vaikutus on haitallisin. Ne voivat hyvin puuskaisella säällä aiheuttaa helposti yli 5 m/sek. virheen. Yleensä pallo kuitenkin nousee normaalia nopeammin. Saatu tuulen arvo on siis liian pieni, mutta myös kerros, jolle se on laskettu, on liian matala. Koska tuuli tavallisesti kiihtyy ylöspäin noustaessa, kompensoituu virhe melkoisesti.

Puuskaisuus aiheuttaa ballistiseen tuuleen myös välittömän virheen, koska hetkellinen tuuli poikkeaa aina oikeaksi katsottavasta keskimääräisestä tuulesta koko lentoradan alueella. Keskituuli taas muuttuu (vanhenee) niin hitaasti, että sitä voimme pitää samana koko lentoradalla. Perättäin tehdyt pilot-havainnot (joista nousunopeuseroista aiheutuva virhe on jo eliminoitu) antavat aina enemmän tai vähemmän toisistaan poikkeavia tuuli-arvoja. Virhe pienenee kerrosten paksuuden kasvaessa, koska eri suuntaisten virheiden välillä tapahtuu kompensoitua.

Ballistinen tuuli saadaan tarkemmin määritetyksi, jos se laskeetaan kahden pilot-havainnon perusteella. Suuren pallonkulutuksen takia olisi tällöin sääsanomien väliaikoja pidennettävä, joten vanhenemisvirhe kasvaisi. Kiivaan taistelutoiminnan aikana on pallonkulutus kuitenkin toisarvoinen tekijä. Myös hyvin puuskaisella säällä tätä keinoa on suositeltava.

Puuskaisuudesta johtuen sääsanoma on virheellinen heti tuoreeltaan. Koska keskituulikin muuttuu ajan funktiona, vanhenee sääsanoman ballistinen tuuli jatkuvasti. Lyhyellä aikavälillä

(muutama tunti) vanheneminen on suoraan verrannollinen aikavälin pituuteen. Jos sääsanoma on kohtalaisen vanha (3-4 tuntia), on vanhenemisesta johtuva virhe yleensä suurin. Kohdassa IV on puuskaisuudesta ja vanhenemisestä johtuvia virheitä käsitelty tarkemmin.

Koska vanheneminen yleensä on huomattavan suuri, olisi sääsanomaa laadittaessa pyrittävä ennustukseen, kuten yleisessä synoptisessa sääpalvelussa on tapana. Ainakin kesäolosuhteissa tuulen ennustaminen tuottaa hyvin suuria vaikeuksia. Ensinnäkin on keskituulen määrittäminen puuskaisuuden takia hankalaa. Toiseksi keskituulivektori muuttuu käännekohdissaan usein sangen jyrkästi, eikä näiden arvostelemisessa ole sääkartoistakaan paljon apua. Tulevaisuudessa jää nähtäväksi, voidaanko riittävän aerologisen materiaalin perusteella päästä tässä suhteessa kyllin tarkkoihin tuloksiin. Tykistölliset vaatimukset ovat nimittäin yleisiä vaatimuksia huomattavasti suuremmat.

Ballistisen tuulen epätarkkuutta lisäävät vielä pienemmät virhe-tekijät. Sellaisia syntyy teodoliittien käsittelyssä sekä laskumenetelmien ja -laitteiden epätarkkuuden kautta (myös tulipattereissa). Käytetyt kerrospainot eivät ole täsmällisiä, ampumataulukoiden kääntöpuolella olevissa korjaustaulukoissa saattaa olla epätarkkuuksia, viestityksessä tehdään virheitä jne. Kaikkien virheiden tarkka määrittäminen on mahdotonta. Kuitenkin virheiden yhteisvaikutuksessa suurimmat virheet ovat täysin määrittäviä tekijöitä. Tässä tapauksessa ne ovat:

- 1) vanhenemisestä johtuva virhe,
- 2) varsinainen puuskaisuusvirhe ja
- 3) nousunopeuseroista johtuva virhe.

Jos nämä virheet ovat v_1 , v_2 ja v_3 , on kokonaisvirhe

$$V = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}.$$

Jonkin ammuntaan vaikuttavan sääelementin määrittämisessä tapahtunut virhe aiheuttaa matka- tai sivupoikkeamavirheen (Δ), joka on suoraan verrannollinen itse sääelementin virheeseen (V) ja lentoaikaan (T). Siis

$$\Delta = k \cdot V \cdot T,$$

missä k on kerroin, jonka arvo riippuu sääelementistä ja vähäisemmässä määrin tykkimallista. Kenttätykistön sääpalveluoppaassa on esitetty joukko tri M. Franssilan laskemia k :n arvoja sekä muitakin virhearviointeja.

b) Vaikutukset lentoradalla.

Edellä suoritettu tarkastelu koski virheitä, jotka ovat syntyneet ennen ammuntaa. Puuskaisuus jää vaikuttamaan vielä ammunnan aikanakin. Koska puuskien kestoajat ovat pitkiä ja niiden ulottuvuudet jopa kilometreinä mitattavissa, emme voi pitää ilmakehää lentoradan alueella ballistisesti homogeenisena. Emme tosin tunne tarkoin puuskien ulottuvuuksia, ellemme suorita tiheitä pilot-havaintoja useassa eri paikassa. Ei ole varmaa, että puuskat kulkevat keskimääräisellä tuulennopeudella, emmekä tiedä kuinka nopeasti ne häviävät ja toisia syntyy tilalle. Ilmeistä kuitenkin on, että ballistinen tuuli on jokaisella laukauksella ja perättäisissä ammunnoissa jossakin määrin erilainen. Erot vielä kasvavat sellaisissa tapauksissa, jolloin jollakin kerrosvälillä on hyvin suuri paino, mikäli kerrospainoteoria pitää paikkansa. Summittaisten laskelmien mukaan ei edellä mainittu ballistisen tuulen vaihtelu saa merkittäviä arvoja muuta kuin ehkä noin 3 km:n ampumamatkan saakka. Näin lyhyillä matkoilla vaikutus matkassa on vähäinen.

On myös odotettavissa, että ammuksen stabiliteetti puuskien johdosta kärsii. Tästä on seurauksena hajonnan kasvu ja ilmeisesti samalla ampumamatkan yleinen lyheneminen. Vuoden 1947 sääkorjausammunnat viittaavatkin tähän. Tulosten analysoinnissa ilmenee kuitenkin eräitä vaikeuksia, jotka osaksi ehkä johtuvat muista tekijöistä. Labiilisuusasteen ja hajonnan sekä matkan lyhenemisen välillä on kylläkin olemassa korrelaatio, mutta ammunnat suoritettiin niin paljon luotausta myöhemmin, että puuskaisuus oli useassa tapauksessa pilot-havaintojen mukaan jo tuntuvasti heikentynyt. Luotaukset suoritettiin nimittäin yleensä klo 15 tienoilla ja ammunnat klo 18 (joitakin päiväammuntoja lukuunottamatta). Tyypillistä oli matkan suhteellisen äkillinen lyhentyminen kuivien korkeapainesäiden aikana, jolloin samalla

pystysuora lämpötilagradientti oli suuri vapaan auringonsäteilyn vuoksi. Hajonta oli keskimääräistä suurempi. Omituista oli, että kostealla säällä ja suoranaishalla sateella suoritettut ammunnat antoivat jopa pisimmän matkan. Samalla oli hajonta suhteellisen pieni siitäkkin huolimatta, että joissakin ilmakehroksissa vallitsi yleensä varsin voimakas puuskaisuus. Ilmiö on mielenkiintoinen ja ansaitsee lisätutkimusta.

IV. Laskelmat.

a) Puuskaisuuslaskelmat.

Edellisten kohtien perusteella olemme saaneet tyydyttävän kuvan tuulivirheiden syistä ja merkityksestä. On jäljellä laskelmien tulosten esittäminen, jotka, kuten alussa on mainittu, koskevat toukokuuta 1947. Niihin sisältyy puuskaisuus- ja vanhene-mislaskelmat, ensin mainitut vuorokauden ajan mukaan määritettyinä. Laskelmat koskevat keskimääräisiä olosuhteita. Yksityistapauksia tutkimalla on löydettävissä vielä joukko asiaa valai-sevia seikkoja, mutta työ on tältä osalta keskeneräinen.

Totesimme puuskaisuuden vaikuttavan nousunopeusvirheen ja varsinaisen puuskaisuusvirheen kautta siten, että ballistinen tuuli on uudessakin sääsanomassa virheellisesti määritetty. Lisäksi tulee vaikutus ammuksen stabiliteettiin. Ensimmäisessä tapauksessa on tehokkaana virheenä pidettävä vain ampumasuuntaan lankeavaa virhekomponenttia, koska sivutuulivirhettä voimme pitää käytännössä merkityksettömänä. Joka tapauksessa on pituustuulivirhe pystyttävä erikseen määrittämään. Selvää on, että keskimääräisissä olosuhteissa sattuu pituustuulella yhtä suuri virhe kuin sivutuulellakin. Molemmat virheet tulevat siis määritetyiksi samalla kertaa.

Voimme kuvitella suorittavamme Niinisalon koeampumaradalla ammuntoja jatkuvasti päivästä toiseen. Radan suuntainen ballis-tisen tuulen virhekomponentti (pohjois—eteläsuunta) on silloin pituustuulivirhe ja poikkisuuntainen (länsi—itä) sivutuulivirhe. Pitempiaikaisessa tilastossa nämä molemmat virheet ovat keski-määrin yhtä suuret. Jos ammuntojen lukumäärä on n , on pituus-

tuuli- sekä sivutuulivirheitä määritetty kumpaakin n kpl., siis yhteensä $2n$ kpl. Kaikki arvot ovat samanveroisia. Kustakin ballistisen tuulen arvosta saamme siis kaksi puuskaisuus(komponentti)arvoa virhelaskuja varten. Laskelmia suoritettaessa on menetelty yllä olevan periaatteen mukaisesti. Tuuli on jaettu ampumaradan suuntaiseen ja sitä vastaan kohtisuoraan komponenttiin. Kumpaistakin on käsitelty itsenäisenä tapauksena. Virheen määrittäminen on selostettu alempana. Vertikaalipuuskaisuuden arvoja saamme kustakin pilot-havainnosta vain yhden.

Molempien horisontaalikomponenttien huomioon ottaminen on tasoittavana tekijänä tärkeätä siitäkin syystä, että tuulella on usein taipumusta puhaltaa tietyltä suunnalta pitemmän aikaa. Niinpä sääkorjausammuntojen aikana tuulella vain kerran sattui olemaan itäinen komponentti (tuuli vaihteli yksinomaan välillä pohjoinen—länsi—etelä).

Tuulivektorit on lyhyin korkeusvälein projisoitu edellä mainituille suunnille. Jos välit ovat pitkiä, aiheutuu nousunopeuseroista virheitä, vaikka onkin käytetty kolmen teodoliitin havainnotoja. Tämä voidaan osoittaa yksinkertaisella esimerkillä. Oletta- kaamme, että 350 m paksussa kerroksessa vallitsee välillä 0—200 m tuulen nopeus 5 m/sek. ja välillä 200—350 m nopeus 1 m/sek. Anniamme pilotpallon, jonka normaalinousunopeus on 150 m/min., nousta läpi koko kerroksen. Todellinen nousunopeus olkoon esim. mikroturbulenssin takia välillä 0—200 m lisääntynyt arvoon 200 m/min. Loppuosalla nousu on normaalinousu. Pallo viipyy 200 m:n korkeusvälillä minuutin, joten se kulkee tuulen mukana matkan 300 m. Loppuosalla pallo viipyy myös minuutin, kulkien siinä ajassa matkan 60 m. Pallo on siis yhteensä edennyt matkan 360 m ja käyttänyt siihen aikaa 2 min. = 120 sek. Tuulen nopeudeksi saamme siis $360 : 120 = 3$ m/sek. Tulos on kuitenkin väärä: koko kerroksen keskituuli on $(200 \cdot 5 + 150 \cdot 1) : 350 = 3,3$ m/sek. Virhe syntyy olipa kysymyksessä horisontaali- tai vertikaalikomponentin laskeminen. (Tarkkuus kasvaa, kun käytetään suuria nousunopeuksia. Ne ovat muussakin suhteessa edullisia.)

Päivän pilot-sarjoista on kustakin havainnosta laskettu määrättyjen kerrosten tuulikeskiarvot ja tulokset esitetty graafisesti ajan funktiona (kuva 1). Viereisten päivien havaintotuloksia

apuna käyttäen saamme heti kuvan keskituulen (kysymyksessä tuulikomponentti) suhteellisen hitaasta vaihtelusta. Tällaisia piirroksia tarkastelemalla toteamme myös helposti luonteenomaiset piirteet puuskaisuuden päivittäisestä vaihtelusta.

Herää kysymys, miten laskutoimitukset puuskaisuuden määrittämiseksi olisi suoritettava, jotta myös päivittäinen vaihtelu saataisiin esille. Voisimme ajatella täysin laskennollista menettelytapaa. Edellytyksenä olisi,

1) että havainnot voitaisiin ryhmitellä osaryhmiin kelloaikojen mukaan;

2) että keskituuli olisi osaryhmien puitteissa ajan lineaarinen funktio;

3) että kuhunkin osaryhmään kuuluisi yhtä monta havaintoa tasaisin aikavälein;

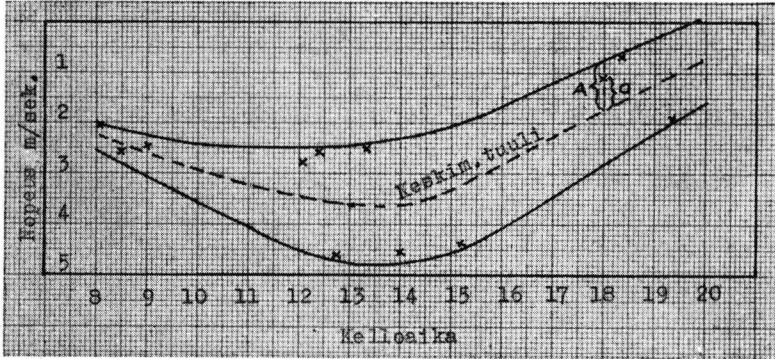
4) että puuskaisuuden päivittäinen vaihtelu ei osaryhmien puitteissa ehtisi vielä mainittavasti vaikuttamaan.

Vaikka ehdot olisivatkin täytetyt, veisivät laskutoimitukset saavutettuun hyötyyn verrattuna tavattoman runsaasti aikaa suuren havaintopistemäärän takia. Tällaisten havaintosarjojen suorittaminen on sitä paitsi meikäläisissä oloissa mahdotonta. Käytännöllisiä tarpeita varten riittävän tarkkoihin tuloksiin voidaan päästä muutenkin. Eräitten kokeilujen jälkeen olen päätenyt seuraavaan, osaksi graafiseen menettelytapaan.

Rajoitamme puuskaisuusalueet käyrillä kuvassa 1 esitetyllä tavalla. Tällä tavoin saamme täydennetyksi havaintojen välille jäävät aukot. Koska puuskaisuusasteen täytyy olla jatkuva ajan funktio, jää virhe joitakin yksityistapauksia lukuun ottamatta pieneksi. Voisimme myös väittää, että käyrien piirtämiseen havaintopisteittenkin kohdalla sisältyy tietystä määrin mielivaltaisuutta. Eri päivien piirroksia tarkasteltaessa havaitsemme, että em. tavalla syntyneet virheet ovat pieniä verrattuna itse puuskaisuuden vaihteluihin päivästä toiseen. (Kun puuskaisuus on pieni, kuten aamuisin ja iltaisin on usein asianlaista, aiheutuu lukematarkkuuden takia suuri prosentuaalinen mutta pieni absoluuttinen virhe.) Myöhemmin on esitetty keino, jonka avulla edellä esitetty, huomattavassa määrin systemaattinen virheellisyys voidaan suurimmaksi osaksi poistaa.

Keskituulen vaihtelua esittävä käyrä kulkee ilmeisesti puuskai-

suusalueen keskeltä. Sen avulla lasketaan tuulen vanheneminen. Myöhemmin vanhenemislaskelmien yhteydessä osoitetaan, ettei vanhenemista laskettaessa tarvitse tarkasti tuntea muita kuin keskituulta kuvaavien käyrien ääniarvokohdat.



Kuva 1.

Tuulen eteläkomponentin vaihtelu 13. 5. 47 korkeusvälillä 0—200 m. Havaintoarvot merkitty risteillä. Tuulikomponentin keskim. kulku esitetty katkoviivalla Havaittu puuskaisuusarvo = a , puuskaisuusamplitudi = A . Suhde $a:A$ ilmaisee monesko osa amplitudista kulloinkin on esiintynyt puuskaisuutena.

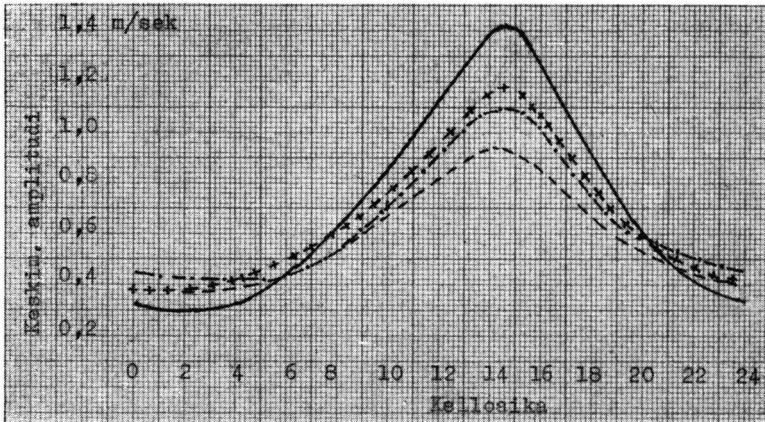
Voidaan pitää kiistanalaisena, kulkeeko keskituulikäyrä yksityisissä tapauksissa täsmälleen puuskaisuusalueen keskellä. Jos olisimme lyhyenä aikajaksona tehneet useita havaintoja, olisi keskituulikomponentin arvo määritettävä yksityisten arvojen keskiarvona, joten se olisi lähempänä sitä puuskaisuusalueen laitaa, minkä puolella on enemmän pisteitä. Koska havaintopisteitä on vähän, riippuisi keskituulikäyrän asema satunnaisista tekijöistä ja sen kulku olisi mutkittelevaa. Voidaan väittää, että silmätarkkuus käyrää piirrettäessä antaa paremman tuloksen kuin turhantarkka matemaattinen spekulointi. Käytännössä voimme katsoa, että keskituulikäyrä kulkee puuskaisuusalueen keskellä.

Puuskaisuuden yleiseksi mitaksi sen päivittäistä kulkua laskettaessa olen ottanut välin keskituulesta puuskaisuusalueen laitaa, siis käytännössä puuskaisuusalueen puolikkaan. (Jos käyrä ei

kulje keskeltä, olisi mitattava kaksi arvoa, joiden keskiarvo kuitenkin olisi sama kuin edellä.) Nimitämme tätä puuskaisuusamplitudiksi. Vertikaalisen puuskaisuusamplitudin laskeminen vastaa edellä esitettyä menettelytapaa. »Tuulipiirros» on laadittu siten, että »tuuleksi» on merkitty ero normaalista nousunopeudesta. Puuskaisuusalue rajoitetaan samoin kuin edellä. Huomattavan puuskaisella säällä koko puuskaisuusalue on nollaviivan positiivisella puolella. Tätä voimme pitää mikroturbulenttisuudesta johtuvana. Vertikaalipuuskaisuusamplitudiksi voimme nytkin ottaa puuskaisuusalueen puolikkaan. On tosin huomattava, että nousevat ilmavirrat ovat rajoituneempia ja nopeampia kuin laskevat. Molempiin suuntiin tapahtuvien virtausten amplitudien keskiarvona menetelmä on puolustettavissa, koska muutakaan keinoa ei liene ajateltavissa. Turbulenttisuusasteen vertikaalisten ja tilapäisten muutosten takia aiheutuu jossakin määrin epätarkkuutta, mutta niiden vaikutus lopputuloksiin on kuitenkin todennäköisesti pieni.

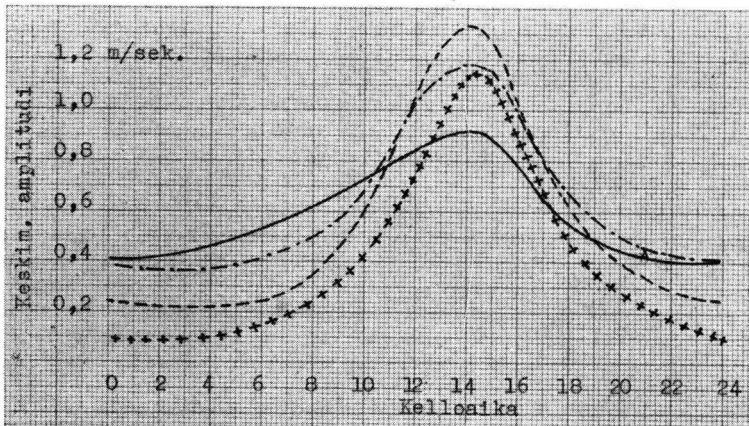
Puuskaisuusamplitudit on tällä tavoin määritetty iltapäivällä jokaiselta täydeltä tunnilta, muulloin joka toiselta. (Kokemus osoittaa, ettei jokatuntinen määrittäminen lisää mainittavasti tarkkuutta, paitsi puuskaisuuden maksimiarvon kohdalla.) Kerrosväleiksi on valittu 0—200 m, 200—400 m, 400—600 m ja 800—1 000 m. Paksummiksi kerroksiksi on otettu 0—500 m (20 sek:n lentoaika) ja 0—1 100 m (30 sek:n lentoaika). Vastavien laskujen suorittaminen ylemmistä kerroksista on tarpeen pitempiä lentoaikoja silmällä pitäen.

Laskettujen amplitudien keskiarvoja esittävät kuvat 2—5. Puuskaisuusamplitudikäyrät esittävät siis puuskaisuuksien keskimääräisiä maksimiarvoja vuorokauden eri aikoina toukokuussa (1947), sikäli kuin on kysymys sääsanoman ballistiseen tuuleen siirtyvistä virheistä. Eihän aina satu, että puuskaisuuden voimakkain vaihe vallitsee juuri silloin, kun pilothavainto tehdään. Joskus virhe voi olla nollakin, vaikka sää on puuskainen. Jos taas on kysymys stabiliteettihäiriöistä, antavat puuskaisuusamplitudit siitäkkin vain suhteellisen kuvan. On laskettava molempien horisontaalikomponenttien (kumpikin yhtä suuria) ja vertikaalikomponentin resultantti ja sekin kerrottava kahdella. Vasta silloin saamme sen tuulikentän kokonaisuutokset, jossa ammus



Kuva 2.
Horisontaalipuuskaisuuden keskimääräiset amplitudiarvot (toinen horis.komponentti). Toukokuu 1947.

————	korkeusväli	o —	200 m
- · -	»	200 —	400 »
- - -	»	400 —	600 »
+ + +	»	800 —	1 000 »



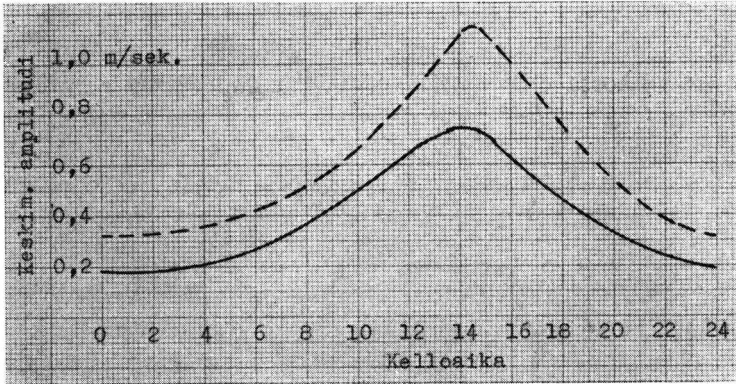
Kuva 3.
Vertikaalipuuskaisuuden keskimääräiset amplitudiarvot toukokuussa 1947.

————	korkeusväli	o —	200 m
- · -	»	200 —	400 »
- - -	»	400 —	600 »
+ + +	»	800 —	1 000 »

joutuu lentämään. Koska hetkellinen tuuli on kulloinkin vaikuttava tekijä, on käytettävä ohuita kerrosvälejä eikä koko laki-korkeuden kerrosta. Tulos on sittenkin hiukan liian pieni. Mitä yöaikoja koskeviin arvoihin tulee, ne on graafisesti interpoloitu käyrien todennäköistä jatkuvuutta hyväksi käyttäen. Niitä on siis pidettävä sangen likimääräisinä.

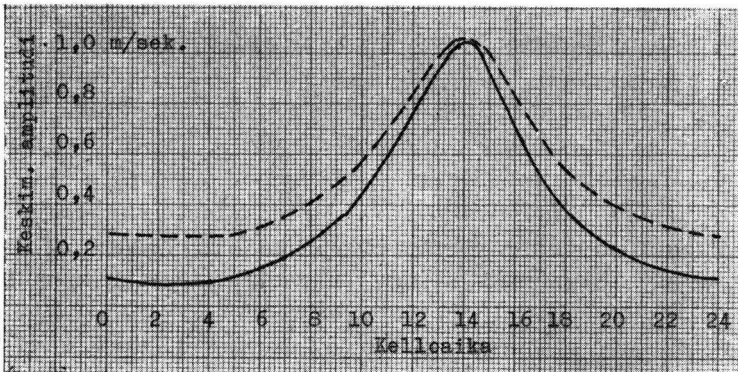
On vastattava kysymykseen: Kuinka suuri on sääsanomaan kulkeutuva varsinainen puuskaisuusvirhe vuorokauden eri aikoina (kun nousunopeuseron kautta syntyvä virhe siis jää pois)? Kysymyksen selvittämiseksi olen menetellyt alla esitetyllä tavalla.

Mitataan kunkin havaintopisteen kohdalla havaintopisteen ero keskituulesta ja lisäksi puuskaisuusamplitudi (vrt. selostusta kuvan 1 alla). Mittalukujen suhde kussakin tapauksessa ilmaisee, kuinka mones osa amplitudista havaintohetkellä olisi kulkeutunut virheenä sääsanomaan. Laskemme suhteen kaikille pisteille kaikissa korkeusväleissä ja otamme keskiarvon. Merkitsemme yksityisissä tapauksissa vaihtelevaa suhteen arvoa $= k$ ja keskiarvoa $= k_0$. Jos k on riippumaton 1) vuorokauden ajasta, 2) amplitudista ja 3) kerrosvälin paksuudesta, on k_0 tarkin mahdollinen arvo keskimääräisen puuskaisuusvirheen määrittämiseksi, mikä on $=$ em. kuvista saatu amplitudin arvo mielivaltaisella kellonlyömällä kerrottuna luvulla k_0 . Käytännöllisissä laskuissa olen jättänyt aivan pienet amplitudin arvot pois, koska lukematarkkuus on liian pieni. Tämä merkitsee samalla sitä, että k_0 :n arvo on määritetty pääasiassa niiden tapausten perusteella, joissa puuskaisuus riippuu termisistä tekijöistä. Voimme olettaa, että ehdot 1) ja 2) likimäärin pätevät tämän puuskaisuuslajin suhteen. Jos k_0 määrittäisiin vuorokauden ajan mukaan, ei tarkkuus siitä paranisi, koska havaintojen lukumäärä on silloin suhteellisen pieni. Ehdon 3) toteamiseksi olen laskenut k_0 :n arvot kultakin kerrosväliltä. Arvot olivat käytännöllisellä tarkkuudella yhtä suuret ja niiden keskiarvoksi tuli 0,615. Oli kuitenkin todettavissa seuraava ilmiö: arvot kasvoivat hiukan siinä järjestyksessä kuin eri kerrosvälien piirroksot olivat valmistuneet. Totesin tämän johtuvan siitä, että olin alussa puuskaisuusalueiden rajakäyriä piirtäessäni jättänyt enemmän »rakoa» käyrien ja uloimpien pisteitten välille, viimeisillä kerrosväleillä taas käyrät olivat uloimmissa pisteissä kiinni. Arvo $k_0 = 0,615$ on hyvin lähellä sinifunktiolle soveltuvaa arvoa $2 : \pi$



Kuva 4.
Horisontaalipuuskaisuuden keskimääräiset amplitudiarvot toukokuussa 1947 (toinen horis.komponentti).

— — — korkeusväli 0— 500 m
 ————— » 0—1 100 »



Kuva 5.
Vertikaalipuuskaisuuden keskimääräiset amplitudiarvot toukokuussa 1947.

— — — korkeusväli 0— 500 m
 ————— » 0—1 100 »

= 0,64. Puuskaisuuskomponenttien vaihtelu (vertikaalipuuskaisuus ml.) näyttää siis likimäärin noudattavan sini-vaihtelua, kun on kysymys yksityisistä puuskista. Silloin tulisi yksityisten $k:n$ arvojen joukossa olla suuria arvoja enemmän kuin pieniä. Niin onkin asianlaita. Laskin myös muutamalta kerrosväliltä todennäköisen $k:n$ arvon (keskimmäisen arvon) ja sain niiden keskiarvoksi 0,7. Laskut olivat varsin summittaisia, joten voitaneen pitää sattumana, että tämä arvo on hyvin lähellä sinifunktiolle pätevää arvoa $\sqrt{2} : 2 = 0,71$.

Edellisen perusteella olen yhdenmukaisuuden vuoksi hiukan korjannut puuskaisuusamplitudien arvoja siten, että niissä kaikilla kerrosväleillä k_0 saa arvon 0,64. Keskimääräinen puuskaisuusvirhe saadaan siis amplitudikäyrien arvoista kertomalla luvulla 0,64. Sen arvot eivät ole millään tavalla muuttuneet, amplitudikäyrät sen sijaan vastaavat paremmin toisiaan keskinäisten suhteittensa puolesta. Voidaan myös osoittaa, ettei eri kerrosvälien puuskaisuusalueitten rajakäyriä piirrettäessä sattuneet erot välttämättä aiheuta virhettä keskimääräisen puuskaisuusvirheen määrittämisessä, jos piirtäminen koko sarjassa on kulloinkin suoritettu systemaattisesti samalla tavoin.

Ei ole vielä mainittu, millainen on erisuuruisten puuskaisuusamplitudien lukuisuus kussakin tapauksessa. Tästä seikasta kuitenkin riippuu mm. todennäköisen virheen arvo. (Aikaisemmin mainittu luku 0,7 merkitsee sitä, että jos tunnemme tällä hetkellä vallitsevan puuskaisuusamplitudin arvon, niin todennäköinen virhe ballistisessa tulessa on 0,7 kertaa se.) Useimmin esiintyvät horisontaaliampplitudien arvot ovat käyristä luettavia arvoja 10 % pienemmät, useimmin esiintyvät vertikaaliampplitudit taas 20 % pienemmät. Aamuisin sattuu suhteellisen pieniä amplitudin arvoja eniten, iltapuolella vähiten, tai ovat käyrien antamat arvot samalla useimmin esiintyviä arvoja. Alimmassa kerroksessa, jossa amplitudien keskiarvo horisontaalipuuskaisuuden osalta on suurin, on useimmin esiintyvä horisontaaliampplitudi suhteellisesti pienin (15 % pienempi käyrien arvoista). Useimmin esiintyvä vertikaaliampplitudi on käyristä luettaviin arvoihin verrattuna pienin 800—1 000 m:n kerroksessa (30 % pienempi). Yllä oleva merkitsee sitä, että suuria amplitudeja on suhteellisesti

vähemmän, mutta ei kovin huomattavassa määrin. On nimitäin toiselta puolen merkille pantavaa, että päiväsaikaan kaikkein pienimmät amplitudit puuttuvat kokonaan.

b) Yleisiä huomioita puuskaisuusamplitudi-
käyrien johdosta.

Käyrien kulusta ilmenee kauniisti puuskaisuuden vuorokautinen jaksollisuus. Puuskaisuus saavuttaa maksiminsa klo 14,00 tai klo 14,00—15,00 välillä. Horisontaalinen puuskaisuus saavuttaa käyrien mukaan maksiminsa hiukan myöhemmin (noin klo 14,30) kuin vertikaalinen puuskaisuus (noin klo 14,00). Onko näin asianlaita laajemman tilaston valossa, on epävarmaa. Vertikaalipuuskaisuuden tuloksiin on jossakin määrin vaikuttanut parina päivänä sattunut puuskaisuuden äkillinen tasoittuminen puolenpäivän tienoissa, ehkä ilmassan vaihtumisen takia.

Kuvasta 2 havaitsemme, että lähellä maanpintaa olevassa ilmakerroksessa horisontaalipuuskaisuus on suurin ja yöllä päinvastoin ehkä pienin (maanpintainversion vaikutus). Pienin horisontaalipuuskaisuus on päivällä noin puolen kilometrin korkeudella. Kuvasta 3 taas havaitsemme, että vertikaalipuuskaisuuden suhteen tilanne on päiväsaikaan täsmälleen päinvastainen. Lähellä maanpintaa on pienin vertikaalipuuskaisuus, minkä voimme ajatella johtuvan siitä, että vertikaalinopeudet maanpintaa lähestyttäessä lähenevät raja-arvoa nolla. Suurin vertikaalipuuskaisuus vallitsee nyt puolen kilometrin korkeudella. Puuskaisuuden eri komponenteilla on siis taipumusta korvata toisiaan: horisontaalisen heikentymistä vastaa vertikaalisen kasvu ja päinvastoin.

Koska horisontaalikomponentteja on kaksi, jotka kumpikin ovat yhtä suuria, on horisontaalipuuskaisuuden kokonaisamplitudi 1,4-kertainen. Kaikki kolme komponenttia taas ovat summittaisesti mitaten yhtä suuria. Näin ollen vertikaalikomponentin suhde kokonaishorisontaaliseen on likimäärin $= 2:3$, vaihdellen kuitenkin eri tapauksissa.

Kuvasta 3 voimme päätellä, että ainakin vertikaalipuuskaisuus alkaa ensin kehittyä alemmissa ilmakerroksissa leviten vähitellen ylöspäin. Kilometrin korkeudessa on maksimikohtakin selvästi

myöhästynyt. Yöarvot ovat täysin likimääräisiä. Niinpä ei liene mahdollista, että vertikaalipuuskaisuus alkaisi alimmassa kerroksessa kasvaa jo puoliyön jälkeen. Syyt ovat ilmeisesti olleet satunnaisia.

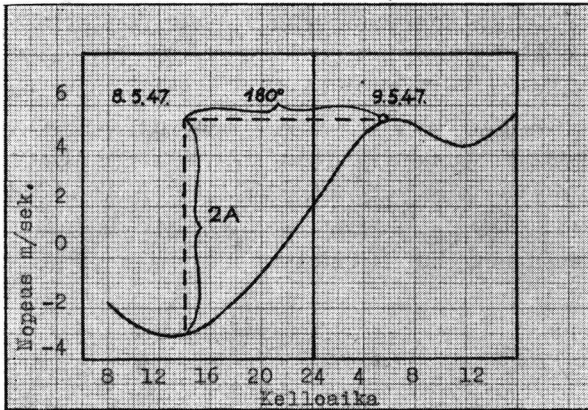
Kuvat 4 ja 5 esittävät 20 ja 30 sek:n lentoaikoja vastaavien kerrosten puuskaisuuksia. Viimeksi mainitun suhteen on tapahtunut huomattavaa horisontaalipuuskaisuuden kompensoitumista eri kerrosten välillä. Vertikaalipuuskaisuuksien maksimiarvot sattuvat, omituista kylläkin, aivan yhteen. Eri lentoaikojen suhteen toteamme lyhyesti, että puuskaisuusvirhe pienenee lentoajan suuretessa eikä keskimääräinen virhe (0,64 kertaa amplitudi) milloinkaan nouse arvoon 1 m/sek. Lisäksi tulee vielä nousunopeuseron välityksellä syntynyt virhe.

c) Vanhenemislaskelmat.

Tuulikomponentin keskimääräistä kulkua kuvaavassa käyrässä on nousuja ja laskuja, milloin jyrkempiä milloin loivempia. Kuva 6 näyttää esimerkin tällaisen käyrän vaihtelusta kahden vuorokauden aikana. Voisimme kuvitella tällaisen käyrän esittävän hyvin epäsäännöllistä sini-vaihtelua. Näiden käyrien avulla olisi laskettava tuulikomponenttien keskimääräiset muutokset tietynpituisten aikavälien kuluttua. Olisi siis esitettävä paljonko komponentit muuttuvat, vanhenevat, esim. kahden tai neljän tunnin kuluessa.

Ensi silmäyksellä näyttää mahdottomalta päästä tulokseen minkään yksinkertaisen matemaattisen keinon avulla. Mekaanisin keinoin vanheneminen voidaan mitata hyvin monesta eri pisteestä lähtien ja siten päästä vaivalloisesti tulokseen. Olen suorittanut tällaisen työn suhteellisen pitkistä havaintosarjoista. Näin saatuihin arvoihin verrattuna antaa seuraava matemaattinen ja käytännössä nopea keino hyvin yhteensoveltuvia arvoja.

Jaetaan vaihtelua kuvaava käyrä pätkiin aallon harjasta laaksoon (vrt. kuva 6), ja käsitellään tällaista pätkää (puoliaaltoa) säännöllisen sini-käyrän osana. Aallon toinen puolikas tosin puuttuu, mutta suuresta havaintomateriaalista puheen ollen voimme aina kuvitella, että vastaava osa löytyy jostakin muualta. Kuvaan on merkitty tällaisen sinikäyräpätjän kaksinkertainen amplitudi



Kuva 6.

Tuulen pohjois-eteläsuuntaisen komponentin vaihtelu
8.—9. 5. 47 (etel.komp.-merkkinen).

(2A). Tuntimäärä, mikä mahtuu aallon laakson ja harjan väliin, vastaa kulmayksikköinä $= \pi$. Tuulikomponentin *keskimääräinen* muutos (vanheneminen) siirryttäessä sini-käyrän mielivaltaisesta pisteestä kulman α verran eteenpäin on

$$V_v = \frac{4}{\pi} \cdot A \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Merkinnät siis tarkoittavat: V_v = vanhenemisvirhe välillä α , α = kulmayksiköiksi muunnettu tuntimäärä, jolle vanheneminen lasketaan, A = amplitudi. Vakiotermin arvoksi tulee 1,27. Edellytyksenä on, että sini-aalto on täydellinen. Vaikka onkin kysymyksessä aallon puolikas, täytyy virheen hävitä kun yksityisten tulosten perusteella lasketaan keskiarvo. Lopullista keskiarvoa laskettaessa on otettava huomioon aikajaksojen pituuksien merkitys: pitemmillä jaksoilla on suurempi »paino». Ymmärrämme hyvin, että jos esim. johonkin aikaväliin mahtuu kaksi sini-aaltoa, joista toinen lyhyt ja toinen hyvin pitkä, ei virhettä voida määrätä molemmista saatujen vanhenemisarvojen keskiarvona, koska pitempi on paljon kauemmin vallitsevana. On edelleen mahdollista, että pääaalttoon liittyy heikkoja sivuaaltoja, jotka tekevät siihen osamutkia. Voidaan kuitenkin osoittaa, että tällaisten häiriöiden vaikutus vanhenemisen arvoon on mitätön.

Kun vanhenemisen aikaväli vastaa puoliaallon pituutta ($\alpha = \pi$), on vanhenemisella maksimiarvo $= 1,27 \cdot A$. Jos aikaväli vastaa koko sini-aallon pituutta ($\alpha = 2\pi$), tulee vanhenemiselle arvo nolla. On selvää, että tällainen sattuma antaa väärän kuvan tarkkunnesta. Ajatusta voidaan kehittää seuraavasti: Havainnonteko voi sattua minä sini-aallon ajankohtana tahansa. Mikä siis on poikkeama keskituulesta *keskimäärin*, kun havainto tehdään mielivaltaisella hetkellä? Tämä on

$$V = \frac{2}{\pi} \cdot A = 0,64 \cdot A .$$

Vakio 0,64 on tuttu puuskaisuuslaskujen yhteydestä. Kaava esittääkin puuskaisuuslaskun periaatetta, mikäli katsomme puuskaisuuden noudattavan sini-funktion lakeja.

Laskemalla vanheneminen edellä esitetyllä tavalla saamme mekaanisin keinoin saatuihin arvoihin verrattuna yhteensoveltuvat tulokset, kun on kysymys kuukausikeskiarvoista. Kun esim. 1 100 m:n kerrokselle tulee mekaanisin keinoin vanheneminen 2 tunnissa $= 0,69$ m/sek, saamme kaavaa käyttäen $= 0,71$ m/sek.

On aluksi mielenkiintoista tarkastella vanhenemistä eri korkeusväleillä. Tulokset ovat seuraavat:

Vanheneminen 2 tunnissa

korkeusväli	0— 200 m,	0,73 m/sek.
»	200— 400 »	0,80 »
»	400— 600 »	0,86 »
»	800—1 000 »	0,84 »

Vanheneminen 4 tunnissa

korkeusväli	0— 200 m,	1,39 m/sek.
»	200— 400 »	1,52 »
»	400— 600 »	1,63 »
»	800—1 000 »	1,62 »

Mitään suurempaa eroa eri korkeuksien välillä ei siis ole. Mahdollisesti vanheneminen hiukan kasvaa ylöspäin. Vanheneminen

on melko tarkasti lineaarisessa suhteessa aikavälin pituuteen, mikä johtuu »aaltojen» huomattavan suuresta pituudesta. Mitään selvää havaintoa siitä, että vanhenemisella olisi ääriarvonsa määrättyinä vuorokaudenaikoina, en ole voinut tehdä. Kähdella alimmalla kerroksella on havaittavissa tuulen tyyntymistä yöksi ja ylimmällä taas mieluummin sen kiihtymistä.

Kun tarkastamme eripaksuisia kerroksia, ovat tulokset seuraavat:

Vanheneminen 2 tunnissa

korkeusväli	0— 200 m,	0,73 m/sek.
»	0— 500 »	0,84 »
»	0—1 100 »	0,71 »

Vanheneminen 4 tunnissa

korkeusväli	0— 200 m,	1,39 m/sek.
»	0— 500 »	1,57 »
»	0—1 100 »	1,36 »

Arvot eivät mainittavammin poikkea aikaisemmin esitetyistä arvoista. Paksuimman kerroksen vanheneminen on hiukan pienentynyt. Useimmin esiintyvät vanhenemisen arvot ovat noin 10 % keskimääräisiä pienemmät. Kysymyksessä ovat tällöin päiväkeskiarvojen lukuisuudet. Aivan pieniä vanhenemisen arvoja esiintyy vähän.

Tuulen vanheneminen on suuri silloin, kun säärintama sivuuttaa paikan. Voimakkaisiin rintamiin liittyy myös suuri pilvisyys ja sateet, joten tällainen tilanne on helposti havaittavissa. Kuitenkin myös korkean selänteen sivuutukseen liittyy usein nopea tuulen vanheneminen, ja tällainen tilanne jää helposti huomaamatta, ellei sääkarttoja ole nähtävissä.

V. Yleisiä tuloksia.

Edellä suoritettua tarkastelua voidaan pitää puutteellisena, koska esim. tykistössä yleisesti käytettyjä todennäköisiä virheitä ei ole täydellisemmin käsitelty. Vaikka virheiden hajonta ei noudattaisikaan

todennäköisyysfunktion lakeja, on todennäköinen virhe siitä huolimatta määritettävissä määritelmänsä perustuen. Asian merkitys on kuitenkin vähäinen. Kun laskemme sääsanoman virhettä, ei liiallisella tarkkuudella ole kuitenkaan käytännöllistä merkitystä. Mieluumminkin on otettava hiukan »pelivaraa». Jos laskemme kohtalaisen vanhan (3—4 tuntia) sääsanoman ballistisen tuulen virheen 30 sek:n lentoajalta, voimme panna:

vanheneminen	1,5 m/sek.
nousunopeusvirhe	1,0 »
vars. puuskaisuus	0,5 »
<hr/>	
kokonaisvirhe \approx	2,0 m/sek.

Lopputuloks ei ole tavallista yhteenlaskua, vaan on käytetty sivulla 170 esitettyä kaavaa. Pituustuudessa 2 m/sek. vastaa noin 50 m matkassa. Muiden virheiden vaikutus ei muuta tulosta, joten voimme sanoa, että *kohtalaisen vanhan sääsanoman tarkkuus 30 sek:n lentoajalla on 50 metriä*. Tämä sopii yleiseksi tarkkuuden mitaksi tavallisilla kenttätykistön lentoajoilla kaikkina vuodenaikoina.

Puuskaisuuden välitön virhe on edellisen mukaan sangen pieni (ei kuitenkaan pienillä lentoajoilla), mutta se vaikuttaa myös nousunopeusvirheen kautta. Kesällä puuskaisuus vielä jossakin määrin lisääntyy. Sen vuotuinen vaihtelu näyttää likimäärin vastaavan vertikaalisesta lämpötilagradientista riippuvan labiilisuusasteen vuotuista vaihtelua. Joulu—helmikuussa on puuskaisuus vähäinen (havaintomateriaali on tosin näiltä kuukausilta liian pieni). Maaliskuun puolivälistä alkaa puuskaisuus kasvaa ja on huhtikuussa usein jopa huomattavan suuri. Sääpalvelun kannalta on puuskaisuuden vuotuisen kulun tunteminen yksityiskohtaisesti tärkeitä.

Puuskaisuuden heikentymistä talvisaikaan näyttää useassa tapauksessa vastaavan vanhenemisen kasvu. Omakohtaiset tutkimukset ovat toistaiseksi vähäisiä.

Tuulen kiihtymisestä tai hidastumisesta ylöspäin noustaessa riippuu mm. kerrospainojen merkitys. Kylmänä vuodenaikana on havaittavissa voimakas kiihtyminen, mutta se rajoittuu tavallisesti hyvin ohueen ilmakerrokseen. Kiihtymisen (tai hidastu-

misen) summittaisesti lasketut keskiarvot viittaavat siihen, ettei kerrospainoilla ainakaan 30 sek:n lentoajalla ole mainittavaa merkitystä. Saman tuloksen antavat vuoden 1947 toukokuulta lasketut yksityiskohtaiset tutkimukset. Puuskaisella säällä tuulimaksimi siirtyy kerroksesta toiseen, joten kerrospainoilla laskettu tuuli voi olla virheellisempi kuin ilman kerrospainoja laskettu.

Yllä olevan perusteella olemme saaneet ylimalkaisen kuvan tuulen »oikullisesta» luonteesta, siitä johtuvista virheistä ja niiden merkityksestä. Samalla olemme saaneet käsityksen niistä vaikeuksista, joiden voittamiseksi sääpalvelun on työskenneltävä tälläkin, tosin pienellä mutta kuitenkin tärkeällä toimialansa osalla.